

Fibra Óptica de Sílica Dopada com Germânio como Dosímetro Termoluminescente em radioterapia.

Cláudia Patrícia Varela Valença^{1*}

Ivanesa Gusmão Martins Soares^{2*}

Germana Louanne Neves Carvalho Leitão^{3*}

RESUMO

Desde a descoberta dos Raios X em 1889 por Willian Conrad Roentgen, o uso da radiação ionizante tem sido bastante utilizada no tratamento de doenças como neoplasias malignas, denominada de câncer (ATTIX, 2004). A técnica utilizada para o tratamento de câncer é conhecida como Radioterapia, que pode ser classificada em Braquiterapia e Teleterapia. No processo de tratamento diferentes etapas são necessárias para garantir a entrega correta da dose para o paciente, desde a mobilização do paciente e localização do alvo até a escolha da energia e forma do feixe a ser utilizado e o cálculo de dose. Os detectores mais utilizados para avaliação de dose absorvida em radioterapia são: as câmaras de Ionização, os filmes radiográficos e os dosímetros termoluminescentes (TLD), os quais possuem vantagem em maior variedade e menor tamanho, indicado para dosimetria *in vitro*. Com base nisso, esse trabalho propôs-se a realizar um levantamento bibliográfico sobre o uso de fibras ópticas como dosímetros termoluminescentes em radioterapia. E foi observado que esses sensores apresentam uma inovação tecnológica na área de dosimetria das radiações ionizantes.

Palavras-chave: Contrastes Iodados. Reações Adversas. Tomografia Computadorizada.

ABSTRACT

Since the discovery of the X-rays in 1889 by Willian Conrad Roentgen, the use of ionizing radiation has been widely used without treatment of diseases such as malignant neoplasms, called cancer (ATTIX, 2004). A technique used for the treatment of cancer and known as Radiotherapy, which can be classified in Brachytherapy and Teletherapy. There is no information available on the subject, from the mobilization of the patient and the location of the target until the choice of energy and the type of test. The most used detectors for the evaluation of absorbed dose in radiotherapy are: as ionization chambers, radiographic films and thermoluminescent dosimeters (TLD), which are superior to the greater variety and smaller size, indicated for *in vitro* dosimetry. Based on this, this work

^{1*} Professora Mestre do Curso de Bacharelado em Tecnologia em Radiologia das Faculdades Integradas de Patos, Paraíba, Brasil. E-mail: claudia.cpvv@gmail.com

^{2*} Professora Mestre do Curso de Bacharelado em Tecnologia em Radiologia das Faculdades Integradas de Patos, Paraíba, Brasil. E-mail: ivanegasusmao@ymail.com

^{3*} Professora Doutora do Curso de Bacharelado em Tecnologia em Radiologia das Faculdades Integradas de Patos, Paraíba, Brasil. E-mail: germanalouanne@gmail.com

proposes to carry out a bibliographical survey on the use of optical fibers as thermoluminescent dosimeters in radiotherapy. And it was observed that these sensors were an innovation in the area of ionizing radiation dosimetry.

Keywords: Thermoluminescent Dosimeter, Radiotherapy, Optical Fiber.

1. INTRODUÇÃO

A radioterapia é um procedimento de tratamento capaz de reduzir ou eliminar células tumorais, utilizando doses pré-calculadas de radiação ionizante. A precisão na entrega da dose ao paciente é fundamental para obter um tratamento seguro e eficaz (SCAFF, 2002). Dessa forma, é descrita uma série de recomendações pelas agências e normas reguladoras como a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA- *International Atomic Energy Agency*), a fim de limitar os níveis de dose, aos quais são submetidos os pacientes como também, aumentar a proteção radiológica sobre os profissionais ocupacionalmente expostos à radiação (IAEA, 2005).

Sendo assim, são utilizados diferentes materiais para mensurar a dose absorvida em radioterapia, desde filmes radiográficos como também, câmaras de ionização e dosímetros termoluminescentes (D'ERRICO, 2006). Dentre eles, as câmaras de ionização são consideradas os dosímetros com menor incerteza no resultado da medição e fornecem valor absoluto de dose. Contudo, o local deve ser cuidadosamente selecionado para evitar um alto gradiente de dose ao longo da câmara e devido ao seu tamanho não são adequadas para dosimetria *in vivo* (OLIVEIRA, 2008).

Dessa forma, são necessários detectores de pequeno porte, que possibilitam medidas mais detalhadas num espaço de alguns milímetros como os detectores de diamante, entretanto, esses tipos de detectores possuem um custo muito elevado. Uma alternativa de custo mais acessível são os dosímetros termoluminescentes que além de possuírem um tamanho reduzido, apresentam uma variedade de configurações disponíveis comercialmente (PROKIE, YUKIHARA, 2008). Dentre os dispositivos TL atualmente tem se pesquisado sobre o uso de Fibra óptica de sílica dopada com germânio para dosimetria termoluminescente, esses materiais dependendo do tipo de fibra e quantidades de dopantes em sua rede cristalina, apresentam alta sensibilidade à radiação que podem ser aplicados na dosimetria em radioterapia (ISSA *et al.*, 2011).

Portanto, este trabalho teve como objetivo realizar um levantamento bibliográfico sobre a aplicação das fibras ópticas de sílica dopada com Germânio como dosímetro em

termoluminescente em radioterapia e suas vantagens em relação aos métodos convencionais de dosimetria.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Dosimetria em Radioterapia

Em radioterapia a maior preocupação concentra-se em garantir uma entrega exata da dose prescrita pelos médicos para os pacientes. De acordo com a literatura, durante o tratamento recomenda-se uma exatidão global da dose entregue no tumor da ordem de $\pm 5\%$ (ICRU). Para obter essa exatidão, várias medidas são realizadas com auxílio de diferentes tipos de dosímetros, como os diodos, semicondutores, detector de diamante, TLDs (dosímetros termoluminescentes), OSLs (Luminescência opticamente estimulada), filmes radiográficos, e principalmente as câmaras de ionização (SCAFF, 2002). As câmaras de ionização são os detectores padrão, recomendadas pelos protocolos internacionais para realização do controle de qualidade dos equipamentos radioterápicos devido a sua exatidão e precisão. No entanto, esses detectores apesar de suas vantagens necessitam de cabos para aquisição das leituras das medidas de dose absorvida além de requerer correções para dosimetria em feixes de alta energia (OLIVEIRA, 2008). Dessa forma, a dosimetria termoluminescente (TL) vem ganhando espaço na radioterapia, pois além de não necessitar de cabos para aquisição das leituras, esses sensores são disponíveis em diversos formatos e possuem um tamanho reduzido em comparação às câmaras de ionização.

A principal vantagem da tecnologia TL é que ela possibilita a medida de doses em regiões onde a câmara de ionização não pode ser utilizada. O TLD é extremamente útil para dosimetria em pacientes, pois permite a sua inserção direta dentro de tecidos ou cavidades do corpo, devido ao seu tamanho. Além disso, eles podem ser utilizados para medidas de distribuição de doses na região de “buildup”, ao redor de fontes de braquiterapia e para monitoramento de dose pessoal (KHAN, 2010).

2.2. Termoluminescência

Quando um material previamente excitado emite luz, ocorre um fenômeno denominado de luminescência. A luminescência pode ser dividida em dois tipos: Fluorescência, quando o material excitado emite luz entre 10^{-10} e 10^{-8} segundos após a excitação, ou Fosforescência, neste caso, o material excitado permanece em um estado metaestável por um tempo superior a 10^{-8} segundos, sendo necessário um estímulo que

promova a desexcitação para que o sistema retorne então ao seu estado fundamental. Os tipos mais comuns de estímulo que provocam a fosforescência são a absorção de luz (Fosforescência Ópticamente Estimulada) e a absorção de calor (Fosforescência Termicamente Estimulada) (BOS, 2007).

Os materiais cristalinos que emitem luz após a absorção de calor, ou seja, materiais fosforescentes também podem ser denominados de materiais termoluminescentes. Dentre as diversas aplicações da termoluminescência se encontram o estudo de defeitos em sólidos, datação geológica e a dosimetria de radiação (OLIVEIRA, 2008).

A dosimetria de radiação é possível uma vez que alguns materiais termoluminescentes podem resitir à temperatura ambiente por períodos de tempos mais longos, emitindo luz após um tratamento térmico de algumas centenas de graus Celcius. A quantidade de luz emitida pelo material termoluminescente é proporcional á dose de radiação absorvida por ele (KHAN, 2010).

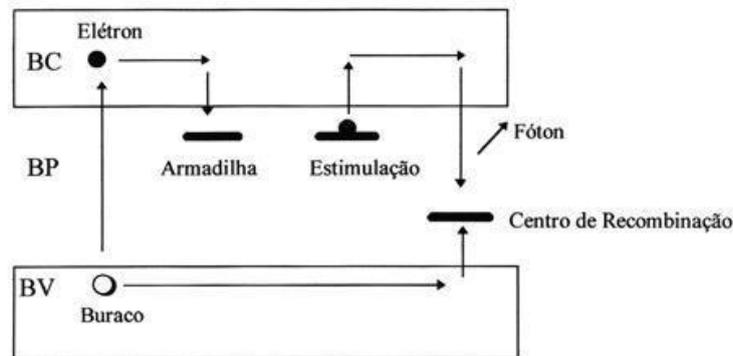
2.2.1. Modelo TL

O mecanismo de Termoluminescência pode ser explicado pelo modelo de bandas de energia, cuja estrutura eletrônica de um material isolante em condições ideais é composta por uma banda de valência (BV), completamente preenchida por elétrons, e uma banda de condução (BC), vazia, ambas separadas por uma faixa larga de estados energéticos não permitidos aos elétrons, e denominada, portanto de banda proibida (BP), cuja largura é chamada de energia da banda gap (E_g). Quando um material cristalino contém ativadores em sua banda proibida, estes geram imperfeições em sua rede cristalina como as armadilhas, que capturam e aprisionam os portadores de carga, e os centros de luminescência.

Quando a radiação ionizante incidente no material TL interage com os elétrons da banda de valência, é cedida energia aos mesmos que vão para a banda de condução deixando livres os buracos da banda de valência. Quando livres, os elétrons e buracos podem mover-se através do cristal havendo a probabilidade deles se recombinarem ou ainda deles serem capturados pelas armadilhas, que se localizam na banda proibida. Como a probabilidade de escape do elétron de uma armadilha aumenta com a temperatura, ele pode ir, durante o aquecimento, para a banda de condução de onde pode vir a se recombinar com o buraco armadilhado emitindo um fóton TL durante o processo. Se as armadilhas dos buracos forem mais rasas, o processo inverso ocorre, havendo também a

emissão de um fóton TL como ilustrado na figura 1. A quantidade de luz emitida pelo cristal é mensurável, a sua intensidade é aumentada com a população de elétrons ou buracos armadilhados, conforme o tipo de armadilha. Ela cresce com a dose absorvida pelo cristal até atingir um máximo, (CAMPOS, 1998).

Figura 1: Diagrama esquemático de excitação e estimulação térmica de um fósforo TL.



Fonte: CAMPOS, 1998.

Muitos Materiais podem ser utilizados para aplicação em termoluminescência, como BeO, Al₂O₃ e CaF₂ (fluorita). Contudo, alguns deles necessitam de adição de impurezas para gerarem imperfeições em sua rede cristalina, dessa forma é produzida uma vasta gama de materiais em laboratórios tais como: LiF:Mg, Ti; LiF:Mg, P, Cu; CaF₂:Mn; CaF₂:Dy; CaSO₄:Dy; CaSO₄: Mn; Li₂B₄O₇:Mn; Li₂B₄O₇:Cu; MgB₄O₇:Dy (CAMPOS, 1998).

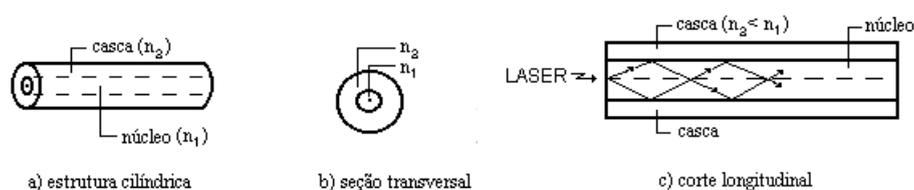
Atualmente o LIF (Fluoreto de Lítio), na sua forma LIF: Mg, Ti é o TL mais comercializado pela indústria mundialmente, devido as suas características como equivalência ao tecido humano, ampla variedade de formas físicas como cristal, pó e bastão, confiabilidade nas medidas e alta sensibilidade à radiação (IZEWSKA, RAJAN, 2005; YUSOFF *et al.*, 2005). Outro TL bastante utilizado é o CaSO₄:Dy (Sulfato de cálcio dopado com disprósio), pois possui baixa dependência energética com a taxa de dose e com as temperaturas. Diversos materiais têm despertado interesse para dosimetria termoluminescentes, entre eles tem se destacado as fibras ópticas de sílica dopada com germânio, pois apresentam uma alta resolução espacial, baixo custo em comparação aos dosímetros termoluminescentes padrão, além de possuir uma natureza impermeável à

água e resistência à corrosão, características que tornam esses materiais promissores para dosimetria em radioterapia (BRADLEY *et al.*, 2012; ONG *et al.*, 2009).

2.3. Fibras ópticas de sílica dopadas com germânio

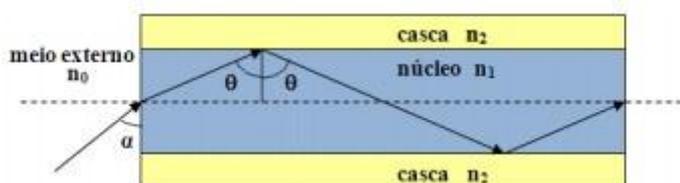
As fibras ópticas são materiais dielétricos e transparentes para faixa da luz visível e infravermelho. São largamente utilizadas em diferentes áreas, principalmente aplicada em sistemas de telecomunicação (ABDULLA *et. al*, 2001). Também podem ser utilizadas como sensores de grandezas físicas e químicas, como por exemplo, temperatura, pressão e concentrações químicas. Além disso, possuem aplicações em medicina e na indústria de automóvel. As partes principais de uma fibra óptica consistem basicamente de um núcleo central cilíndrico envolvido por uma camada denominada de casca (cladding) (BRADLEY, 2012).

Figura 2: Diagrama esquemático da estrutura de uma fibra óptica.



Os materiais mais usados para fabricação de fibras ópticas são a sílica que pode ser pura ou dopada. Quando essas fibras são irradiadas os elétrons livres são armadilhados pelo material dopante, mantendo-se presos durante certo período de tempo à temperatura ambiente até que a fibra seja aquecida, resultando na emissão de luz (ONG *et al*, 2009). A condução da luz por uma fibra óptica baseia-se no fenômeno físico denominado de reflexão total da luz (YAAKOB *et al.*, 2011). Cujas luz deve sair de um meio mais refringente para um meio menos refringente, dessa forma para que a luz se propague através deste fenômeno é necessário que o índice de refração do núcleo seja maior que o da casca. Neste fenômeno ocorre a transmissão do raio luminoso do núcleo da fibra, que apresenta índice de refração n_1 , para a casca da fibra de índice de refração n_2 , onde $n_2 < n_1$, em seguida o raio é retroespalhado onde permanece sofrendo reflexão interna total até o final da fibra, onde ele é transmitido para o meio externo como mostrado na Figura 3 (BUSHUK, S. *et al*, 2003).

Figura 3: Vista longitudinal de uma fibra óptica cuja propagação luminosa é explicada pela Reflexão Interna Total.



Fonte: LIXANDRÃO, 2010.

2.3.1. Fabricação

O principal método de fabricação das fibras ópticas é o processo de deposição química por fase vapor modificada (MCVD-Modified Chemical Vapour Deposition), utilizando como principal dopante o germânio, pois este gás aumenta o índice de refração da sílica (DAMBUL *et al.*, 2011). No processo de MCVD utilizam-se geralmente o GeCl_4 , SiCl_4 , e O_2 como os principais reagentes para a produção de uma pré-forma. Esses reagentes são introduzidos em um tubo de sílica pura aquecido com uma chama de oxí-hidrogênio, como produto da reação entre os gases são gerados os SiO_2 e GeO_2 , que são caracterizados como micro-partículas sólidas brancas na vizinhança da zona de calor (ADIKAN *et al.*, 2012). Como a pré-forma fabricada possui dimensões macroscópicas, esta deve ser transformada em uma fibra através do processo denominado puxamento. Neste processo a pré-forma é posicionada sobre uma torre de puxamento, que a introduz em um forno com alta temperatura em torno de 2000°C . O material é alongado até se tornar um capilar de vidro, cujo diâmetro depende da velocidade de alimentação da pré-forma no forno a qual é controlada por um sistema computacional.

3. METODOLOGIA

Trata-se de uma pesquisa bibliográfica baseada em trabalhos de revisão integrativa, a qual tem sido bastante indicada para o desenvolvimento do conhecimento em diferentes áreas. Nesta pesquisa, a revisão foi composta pelas seguintes etapas: definição do tema e o principal objetivo; estabelecimento de critérios para inclusão e exclusão de estudos; pesquisa literária sobre o tema selecionado; categorização dos estudos; interpretação dos resultados e apresentação da revisão do conhecimento.

Para seleção da amostra, foram lidos os resumos de um grande número de trabalhos, a fim de verificar a relação com o tema a ser pesquisado. Dessa forma, a amostra final foi composta por 05 artigos, com idiomas em inglês, uma amostra pequena tendo em vista da temática estudada ser bastante inovadora. Além disso, foram utilizados como base de estudo, outras fontes como: tese, trabalho de conclusão de curso e livros, que contribuíram para conhecimento teórico sobre os assuntos envolvendo tomografia computadorizada e contraste radiográfico.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os artigos selecionados, que compuseram a amostra desse trabalho, encontram-se descritos a seguir. Dentre as ações encontradas nos artigos analisados observa-se que as fibras ópticas de sílica dopadas com germânio despertam interesse em todas as partes do mundo. Diversos grupos de pesquisa têm submetidos esses materiais a diferentes tipos de radiação e energia a fim de conhecer a sensibilidade desses dispositivos a ambos os feixes de fótons e elétrons. Com esse objetivo Hashim e colaboradores (2009) avaliaram a resposta de fibras ópticas de sílica dopadas com Germânio quando irradiados com fótons de 6 MV de energia e feixes de elétrons com energias de 6, 9 e 12 MeV, provenientes de um acelerador linear, verificando que essas fibras apresentaram resposta linear com doses de até 4 Gy, tendo uma perda de sensibilidade inferior a 10%. A utilização das fibras ópticas na radioterapia também foi avaliada em relação à dosimetria *in vivo* pela técnica da radioterapia de intensidade modulada (IMRT) no tratamento de tumores de próstata em 2011 por Noramaliza e colaboradores, as quais demonstraram uma resposta similar aos TLDs de LiF com uma variação de 2,2%.

Issa e colaboradores (2011) avaliaram a resposta desses materiais utilizando um equipamento de Raios X industrial, empregando feixes de 90 e 300 kVp, obtendo uma resposta linear para ambas as faixas de energia avaliadas, com uma sensibilidade para 90 kVp aproximadamente quatro vezes maior em relação à sensibilidade a 300 kVp, como esperado uma vez para fótons de energias mais baixa tem-se a contribuição do efeito fotoelétrico.

Noramaliza e colaboradores (2012), verificou que os dosímetros de LiF apresentou uma perda de sinal de 5% e as Fibras ópticas, 8% após um período de 133 dias de armazenamento.

Mais recentemente, Begun e colaboradores (2015) fabricaram três amostras de fibras ópticas de tamanhos diferentes as quais foram irradiadas com fótons de energia de 6 e 10 MV e feixes de elétrons de 6 MeV e 9 MeV, e doses de 0,5 Gy à 8 Gy. Todas as amostras apresentaram resposta linear, no entanto a fibra de menor diâmetro forneceu um sinal TL maior em relação às fibras de diâmetro superior uma vez que essas fibras apresentam uma atenuação à luminescência, acarretando em uma perda de sinal TL. Além disso, essa fibra óptica apresentou um rendimento TL 61% superior aos rendimentos dos TLDS padrões de LiF.

5. CONCLUSÕES

Com base neste estudo, verificou-se que apesar do déficit tanto de estudos internacionais como de estudos nacionais sobre este assunto, esta pesquisa pode ser considerada como um fato mobilizador para que se prossiga com novos eixos que abordem esta temática, no intuito de obter mais informações sobre este assunto.

Uma vez que de acordo com os resultados das fibras ópticas, conclui-se que como as mesmas apresentaram alto sinal TL além de uma resposta linear com a dose, torna-se evidente, portanto, que esses materiais são uma alternativa de baixo custo e eficaz quando comparados com os dosímetros termoluminescentes comumente utilizados, sendo uma inovação tecnológica no que concerne a dosimetria das radiações ionizantes.

REFERÊNCIAS

ABDULLA, Y.A., AMIN, Y.M., BRADLEY, D.A. The thermoluminescence response of Ge-doped optical fibre subjected to photon irradiation. **Radiat. Phys. Chem.** V. 61, pp.409–410, 2001.

ADIKAN, F.R.M., SANDOGHCHI, S.R., WU, YI, C., SIMPSON, R.E., MAHDI, M.A., WEBB, A.S., GATES, C.J., HOLMES, C.. Direct UV written optical waveguides in flexible glass flat fiber chips. **IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.** 18 (5), 1534–1538, 2012.

BEGUM, M. , MIZANUR, A.K.M, ABDUL-RASHID,H.A. , Z. YUSOFF, K.A. MAT-SHARIF, M.I. ZULKIFLI, S.Z. MUHAMAD-YASIN, N.M. UNG, . KADIR, A.B.A,

AMIN, Y.M. Comparison of Thermoluminescence response of different sized Ge-doped flat fibers as a dosimeter. **Radiation Physics and Chemistry**. V. 116, pp.155–159, 2015.

BOS, A. J. J. Theory Of Thermoluminescence. **Radiation Measurements**. V. 40, pp.4145-4156, 2007.

BRADLEY, D.A., NISBET, A., ABDUL RAHMAN, A.T., ISSA, F., MOHD NOOR, N., ALALAWI, A., HUGTENBURG, R.P. Review of doped silica glass optical fiber: their properties and potential applications in radiation therapy dosimetry. **Appl. Radiat. Isot.** V. 71, pp. 2–11, 2012.

BUSHUK, S. **Spectroscopic and non-linear properties of anthracene - containing siliconorganic polymers in solutions**. First International Conference on Advanced. Ucrânia: Advanced Optoelectronics and Lasers. 2003. p. 198-200

DAMBUL, K.D., TAMCHEK, T., SANDOGHCHI, S.R., ABU HASSAN, M.R., TEE, D.C., ADIKAN, F.R. M. **Fabrication and Characterization of Flat Fibers**. IEEE 2nd International Conference on Photonics (ICP), 2011.

D'ERRICO, F. Dosimetric Issues in Radiation Protection Of Radiotherapy Patients. **Radiation Protection Dosimetry**. V.118, n.2, pp. 205-212, 2006.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Radiation Oncology Physics**. A Handbook for Teachers and Students, Vienna, 2005.

ISSA, F., LATIP, N.A.A., BRADLEY, D.A., NISBET, A. Ge-doped optical fibres as thermoluminescence dosimeters for kilo voltage X-ray therapy irradiations. **Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A** 652 (1), pp. 834–837, 2011.

IZEWSKA, J., RAJAN, G. **Radiation dosimeters In: Podgorsak, E.B. (Ed.), Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students**. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2005.

KHAN, F.M.. **The Physics Of Radiation Therapy**. 3 ed. USA: Lippincott Williams Wilkins, 2010.

LIXANDRÃO, R. R. S. **Desenvolvimento e caracterização de um dosímetro de cintilação para controle de qualidade em radioterapia**. 83F. Dissertação (Mestrado em Clínica Médica)- Universidade Estadual de Campinas. Recife, 2010.

OLIVEIRA, J. S. **Avaliação dos Parâmetros Dosimétricos em Feixes de Fótons De Radioterapia Usando Fototransistor SMT**. 79F. Dissertação (Mestrado em Tecnologias energéticas e Nucleares)- Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2008.

ONG, C. L; KANDAIYA, S; KHO, H. T; CHONG, M. T. Segments of a commercial Ge-doped optical fiber as a thermoluminescent dosimeter in radiotherapy. *Radiation Measurements*. V44, pp.158-162, 2009.

PROKIÉ, M.; YUKIHARA, E. G. Dosimetric Characteristics Of High Sensitive Mg₂SiO₄: Tb Solid TL Detector. *Radiation Measurements*. V.43, n.2, pp.463-466, 2008.

SCAFF, L. A. M.; **Física da Radioterapia**. São Paulo: Sarvier, ISBN: 85-7378-082-7, 2002.

YUSOFF, A.L., HUGTENBURG, R.P., BRADLEY, D.A. Review of development of a silica based thermoluminescence dosimeter. **Radiat. Phys. Chem.** V. 74, pp. 459–481, 2005.